

Primerjalna analiza značilnosti impedančnih vlagomerov

Domen Hudoklin

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za metrologijo in kakovost (LMK), Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: domen.hudoklin@fe.uni-lj.si

Povzetek. Senzorji, ki temeljijo na principu merjenja impedance, so najpogosteje uporabljeni merilniki vlažnosti, saj predstavljajo najboljši kompromis med točnostjo in stroški. Točnost ključno omejuje občutljivost in ločljivost merjenja nizkih kapacitivnosti ter sorpcijske lastnosti higroskopičnega dielektrika. To se pogosto izraža v povečani histerezi, lezenju ter v drugi virih neobnovljivosti. Cilj znanosti in proizvajalcev je čim bolj zmanjšati te neželene vplive. Problem nastane, ko se za ocenjevanje uporabimo ne dovolj točen referenčni merilnik, ki ravno tako temelji na merjenju impedance. Meritve so tako med sabo visoko korelirane, ocena vplivov pa s tem podcenjena.

Pregled literature nakazuje, da napake v oceni lahko znašajo več odstotkov relativne vlažnosti, kar je za ciljno negotovost najboljših vlagomerov pod 1 % nesprejemljivo. Pomanjkanje analiz, ki uporabljajo bolj stabilne in nekorelirane reference, otežuje realno oceno napredka in specifikacij proizvajalcev. Zato članek predstavlja analizo več kot 100 impedančnih vlagomerov različnih proizvajalcev, ki so bili umerjeni v obdobju 17 let. Kot referenca je bil uporabljen merilnik rosišča, sledljiv na naš nacionalni etalon vlažnosti, ki ima za velikostni razred višjo stabilnost in točnost. Rezultati ponujajo realnejšo sliko o vplivu histereze, lezenja in ostalih virov neobnovljivosti.

Ključne besede: impedančni vlagomer, histereza, lezenje, higrometrija

Benchmarking the characteristics of impedance-based humidity sensors

Sensors based on impedance measurement are the most common humidity meters, offering a balance between accuracy and cost. However, their accuracy is significantly impacted by limited sensitivity and resolution in low capacitance measurements, as well as the sorption properties of the hygroscopic dielectric. These factors increase hysteresis, long-term drift, and other reproducibility sources. Both science and manufacturers strive to minimize these effects. Problems arise when an insufficiently accurate reference meter, also based on impedance measurement, is used for evaluation, resulting in highly correlated measurements and underestimated effects.

Literature suggests estimation errors can reach several percentage points of relative humidity, which exceeds the target uncertainty of less than 1% for the best hygrometers. The lack of analyses with more stable, uncorrelated references hinders realistic progress assessment and manufacturer specifications. This article presents an analysis of over 100 impedance hygrometers of varying quality, calibrated over 17 years. A dew point meter, traceable to the national humidity standard and significantly more stable and accurate, was used for reference. The results offer a more realistic understanding of the impact of hysteresis, long-term drift, and reproducibility issues.

1 UVOD

Zaradi pogostosti uporabe so impedančni vlagomeri predmet nenehnih raziskav in izboljšav. Celovit pregled literature [1] kaže, da so impedančni vlagomeri keramičnim dielektrikom obravnavani v približno 2 % vseh publikacij o senzorjih. Izjemne izboljšave občutljivosti in odzivnega časa pri merjenju nizkih impedanc so raziskave usmerile tudi na dolgoročno lezenje, histerezo in obnovljivost, ki so glavni viri napak pri merjenju vlage. Te lastnosti vplivajo na zanesljivost meritev v različnih aplikacijah [2-4], kot so raziskave materialov, farmacija, industrijsko testiranje, spremljanje okolja in senzorske mreže. Pri ciljni negotovosti pod 1 % relativne vlage je nujno skrbno testirati vse parametre.

V primerjavi z večino ostalih senzorjev, je **histereza** pri impedančnih vlagomerih posebej izrazita zaradi sorpcijskih lastnosti higroskopičnega dielektrika. Pregled literature kaže, da je pri ocenjevanju lastnosti novih senzorjev učinek histereze mnogokrat prezrt [5-7]. Pri tistih, ki so jo ocenili, znašajo vrednosti od manj kot 1 % do 10 % in več [8-16]. Ponekod je histereza nad 3 % ocenjena kot izredno majhna ter kot glavna odlika predstavljenega dielektrika [17, 18]. Ocene so vprašljive, če histerezo merimo z referenčnim merilnikom, ki je tudi impedančni vlagomer s svojo

histerezo. Še bolj je vprašljiv način merjenja histereze z uporabo nasičenih in nenasasičenih raztopin soli, ki ustvarijo določene vrednosti relativne vlažnosti [14, 17, 19-23]. Namreč pri prenosu senzorja med celicami z različnimi vlažnostmi je senzor za kratek čas izpostavljen okoliški vlažnosti. To v kombinaciji s hitrimi odzivi reda nekaj sekund pomeni, da ni ustrezno nadzorovano naraščanje ali padanje merjene veličine – relativne vlažnosti. To je tudi eden od razlogov, zakaj je v tem članku poudarjena uporaba generatorja vlažnosti.

Dolgoročna stabilnost ali **lezenje** vlagomera je še en pomemben parameter, ki vpliva na kakovost proizvodnih procesov. Kazanje stabilnih impedančnih vlagomerov se letno spreminja manj kot 1 %, medtem ko lahko spremembe pri manj stabilnih dosežejo do 5 % ali več. Periodično umerjanje z bolj stabilnim referenčnim senzorjem je nujno. Podroben pregled literature [1, 7, 15, 24-26] kaže, da je lezenje redko raziskano, kljub velikemu vplivu na zanesljivost meritev, kar je lahko posledica visokih stroškov in dolgotrajnosti testov. Pri mnogih testiranjih zato senzorje ciklično preskušajo v krajšem časovnem obdobju [10, 12, 27-29] ali pa spremljajo spremembo kazanja v določeni točki za krajše obdobje – od nekaj ur do enega meseca [14-16 18-22]. Oboje pomeni sprejemanje kompromisov zaradi pomanjkanja časa ter zaradi uporabe nestabilnih referenčnih senzorjev oz. soli.

Zaradi tega je težko primerjati objavljene podatke in spremljati napredek razvoja impedančnih vlagomerov. To delo predstavlja analizo več kot 100 vlagomerov, umerjenih s stabilnim referenčnim merilnikom rosišča. Vlagomeri so komercialno dostopni merilniki, ki so bili v uporabi različno dolgo - od novih do 12 let starih. To predstavlja zelo veliko zalogo vzorcev, saj imajo razvijalci zaradi fokusa in cene na voljo le manjše število merilnikov, ki so komercialno dobavljivi. Po drugi strani imajo proizvajalci na voljo veliko število merilnikov, vendar pa temeljijo na isti tehnologiji oz. so istega tipa. V primeru kalibracijskega laboratorija, kot je naš, imamo vpogled do merilnih lastnosti velikega števila različnih tipov impedančnih merilnikov. Tako pridobljeni podatki omogočajo objektivno oceno pomembnih pomanjkljivosti teh merilnikov in so pridobljeni iz dolge zgodovine umerjanj v Laboratoriju za metrologijo (LMK), ki je nosilec nacionalnega etalona za termodinamično temperaturo in vlažnost.

2 REFERENČNI MERILNIK

Izbira referenčnega instrumenta je običajno odvisna od pričakovanega delovanja testiranega senzorja. Med več kot 100 različnimi vlagomeri, so bili izbrani le tisti, ki so bili umerjeni z najboljšo razpoložljivo referenčno opremo. Ta je vključevala generator vlage Thunder Scientific 2500, ki najprej ustvari stabilne pogoje temperature t in relativne vlažnosti φ . Referenčna vrednost φ_{ref} je bila posredno izmerjena s kalibriranim precizijskim rosiščnim vlagomerom MBW 373 ter s 100 Ω platinastim upornim termometrom, ki meri

temperatur zraka t_z . Rosiščni vlagomer deluje na drugačnem merilnem principu, saj ohlaja zrcalo do temperature, ko se na njem pojavi kondenzacija. Uporovni termometer tik pod površino zrcala tako izmeri temperaturo rosišča t_r . Referenčno relativno vlažnost φ_{ref} nato veliko točneje izračunamo z enačbo (1):

$$\varphi_{\text{ref}} = \frac{e_s(t_r)}{e_s(t_z)} \cdot 100 \% \quad (1)$$

kjer e_s predstavlja Sonntagovo empirično enačbo za delni tlak nasičenja vodne pare [30].

Rosiščni vlagomer vsako umerjamo s primarnim generatorjem rosišča [31], ki zagotavlja sledljivost do mednarodne lestvice rosišča [32]. Na podoben način je preko nacionalnega etalona za temperaturo zagotovljena sledljivost meritev temperature zraka t_z .

S to nastavitvijo lahko dosežemo nižjo standardno negotovost do 0,4 % na zgornji meji območja 95 %. Ta negotovost združuje vse tukaj prej omenjene prispevke, ki so predmet te analize.

Glavni razlog za izbiro teh instrumentov je njihova večja stabilnost zaradi drugačnih principov merjenja. Ti niso odvisni od lastnosti materiala, kot je to pri impedančnih vlagomerih. Posledično so meritve vplivnih parametrov z referenčnim senzorjem nekorelirane z meritvami, opravljene z impedančnimi vlagomeri.

3 METODOLOGIJA PRIMERJALNE ANALIZE

V analizi so zajeti komercialno dostopni impedančni vlagomere, ki trenutno izkazujejo najboljše lastnosti. Med njimi nekateri najuspešnejši modeli proizvajalcev, kot so Vaisala, Rotronic, Testo, Fluke itd. Identifikacije posameznih senzorjev so zaradi komercialno občutljivih informacij izključene iz rezultatov. V nadaljevanju je opisana metodologija za merjenje vsakega od vplivnih parametrov.

3.1 Lezenje

Za vsak izbrani senzor je bilo določeno odstopanje $E_{\text{lez},k,y}$ izmerjene vrednosti $\varphi_{\text{ind},k,y}$ od referenčne vrednosti relativne vlažnosti $\varphi_{\text{ref},k,y}$ s periodičnimi umerjanji, kot navaja enačba (2).

$$E_{\text{lez},k,y} = \varphi_{\text{ind},k,y} - \varphi_{\text{ref},k,y} \quad (2)$$

Indeksa k in y v enačbi (2) označujeta k -ti senzor in zaporedno leto. Podatki vključujejo meritve, zajete v obdobju 17 let.

Za primerjavo so bila dodana odstopanja starejšega rosiščnega merilnika druge klase za celotno obdobje 17 let. Namen tega je prikazati dolgoročno stabilnost bistveno drugačnega merilnega principa, čeprav je

njegova točnost približno trikrat slabša od referenčnega merilnika.

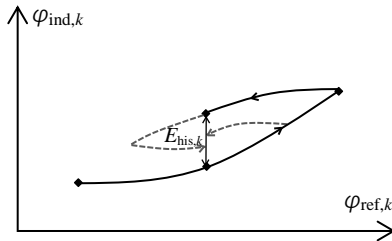
3.2 Histereza

Učinek histereze je v osnovi odvisen od tega, ali je merjena veličina prej naraščala ali padala ter kolikšna je bila ta sprememba. Pri impedančnih vlagomerih se ta sprememba pojavi zaradi razlik v absorpcijskih in desorpcijskih lastnosti dielektrika, kar pogosto predstavlja glavni vir napak.

Za to študijo je bilo izbranih 113 različnih vlagomerov, izdelanih pri več kot 20 različnih proizvajalcih. Izbrani so bili zato, ker so bili umerjeni v istem območju relativne vlažnosti pri sobni temperaturi v enem letu. Za vsak k -ti senzor smo izmerili odstopanje njegovega kazanja $\varphi_{\text{ind},k,\uparrow}$ od referenčne vrednosti $\varphi_{\text{ref},k,\uparrow}$ pri nastavljeni vrednosti 50 %, medtem ko je ta zrasla z 10 %. Nato smo meritev ponovili, ko se je relativna vlažnost zmanjšala z 90 % (pri nekaterih 95 %) na 50 %. Napako zaradi histereze, $E_{\text{his},k}$ nato izračunamo v skladu z enačbo (3):

$$E_{\text{his},k} \Big|_{\varphi_{\text{ref},k}} = \left| (\varphi_{\text{ind},k,\uparrow} - \varphi_{\text{ref},k,\uparrow}) - (\varphi_{\text{ind},k,\downarrow} - \varphi_{\text{ref},k,\downarrow}) \right| \quad (3)$$

50 % je izbrano zato, ker je na sredini območja pričakovati največji učinek histereze $\hat{E}_{\text{his},k} = E_{\text{his},k} \Big|_{50\%}$, kot prikazuje primer na sliki 1.



Slika 1: Primer histereze kazanja vlagomera; črna črta prikazuje pot do največje napake zaradi histereze, siva črtkana črta pa vmesne možnosti

Ker so v splošnem spremembe različnih velikosti in predznaka, predstavlja $\hat{E}_{\text{his},k}$ največjo napako oz. mejo pogreška. Napaka E zaradi histereze tako lahko zavzame katerokoli vrednost na intervalu $\left[-\frac{\hat{E}_{\text{his},k}}{2}, +\frac{\hat{E}_{\text{his},k}}{2}\right]$. Kadar ne nadziramo spremembe (običajno), je njena narava naključna, njen učinek na kazanje instrumenta pa opredelimo z dodatno negotovostjo $u(E_{\text{his},k})$. Če predpostavimo, da je gostota verjetnosti znotraj tega intervala enakomerna in znaša

$p(E) = 1/\hat{E}_{\text{his},k}$, lahko zapišemo standardno negotovost kot standardni odklon σ z naslednjo enačbo:

$$\sigma = u(E_{\text{his},k}) = \sqrt{\int_{-\frac{\hat{E}_{\text{his},k}}{2}}^{+\frac{\hat{E}_{\text{his},k}}{2}} E^2 \cdot p(E) dE} \quad (4)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{\hat{E}_{\text{his},k}} \frac{E^3}{3} \Big|_{-\frac{\hat{E}_{\text{his},k}}{2}}^{+\frac{\hat{E}_{\text{his},k}}{2}}} = \frac{\hat{E}_{\text{his},k}}{2\sqrt{3}}$$

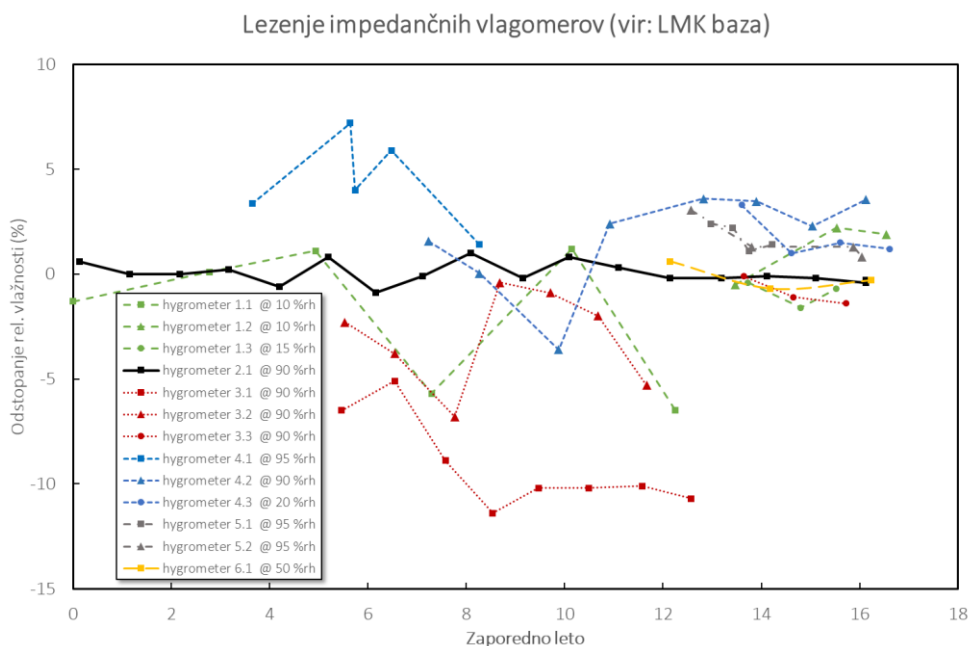
3.3 Ostali razlogi za (ne)obnovljivost

Pri obnovljivosti merimo učinek vsek preostalih virov napak, kot so preostale napetosti elektronike, vpliv temperature, omejeno število kalibracijskih točk itd. Za določitev tega učinka na različne načine, razen s spremembo vlažnosti, vplivamo na odziv sensorja. Obnovljivost določimo z izračunom standardnega raztrosa vrednosti okrog prilegane krivulje. Če je ta krivulja prvega reda, lahko obnovljivosti imenujemo tudi nelinearnost. Standardni raztros predstavlja standardno negotovost u_{obn} . V analizo je bilo vključenih 76 senzorjev različnih proizvajalcev. Za pridobitev čim večjega vzorca so bili primerjani rezultati umerjanj pri sobni temperaturi skozi celotno leto. Prilagana krivulja je bila polinom največ drugega reda.

4 REZULTATI

Slika 2 prikazuje odstopanja $E_{\text{lez},k,y}$ za izbrane senzorcje, pridobljena z rednimi kalibracijami v skupnem obdobju 17 let. Vsak impedančni senzor je prikazan s svojo črto. Grafi z enako barvo ali vzorcem predstavljajo istega proizvajalca. Kot je že omenjeno, je za primerjavo dodano lezenje merilnika rosišča druge klase, ki je prikazano s polno črno črto. Lezenje je merjeno za vsako točko relativne vlažnosti posebej, na grafu pa so zaradi jasnosti prikazane samo tiste točke, kjer je bila medletna sprememba največja. Te točke so navedene v legendi grafa ter v tabeli 1 (Kal. točka).

Tabela 1 numerično povzema rezultate za izbrane senzorcje. Vlagomeri so razvrščeni po proizvajalcu (prva številka številke vlagomera). V stolpcu 3 je prikazano trajanje spremljanja lezenja v letih, v stolpcu 4 pa perioda ponovnega umerjanja. Stolpca 5 in 6 prikazujeta največje odstopanje v celotnem obdobju umerjanja oziroma povprečno odstopanje v posamezni periodi.



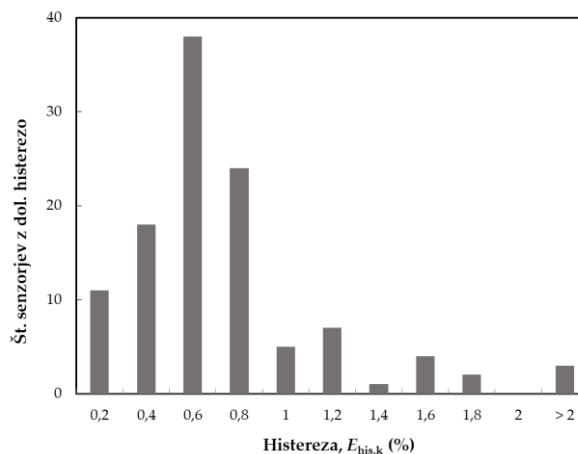
Slika 2: Sprememba odstopanja različnih impedančnih vlagomerov od reference – lezenje – skozi zgodovino; grafi z isto barvo oz. vzorcem predstavljajo istega proizvajalca; Črna polna črta predstavlja lezenje rosiščnega vlagomera druge klase

Tabela 1. Številčna predstavitev lezenja za posamezne vlagomere

VI. št.	Kal. točka (%)	Trajanje (leta)	Kal. perioda (mesece)	Največji std. raztros (%)	Povpr. Std. raztros (%)
1.1	10	12	30	7,7	4,8
1.2	10	3	18	2,7	1,5
1.3	15	3	12	1,2	0,7
2.1	90	16	12	1,7	0,6
3.1	90	7	12	3,8	1,4
3.2	90	6	12	6,4	2,6
3.3	90	6	12	1,0	0,7
4.1	95	5	14	4,5	3,4
4.2	90	9	15	6,0	2,1
4.3	20	3	12	2,3	1,0
5.1	95	2	6	1,1	0,5
5.2	95	4	14	1,8	0,8
6.1	50	4	24	1,3	0,9

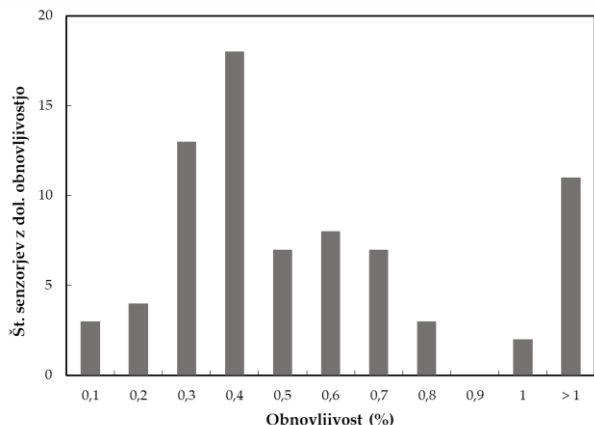
Slika 2 in tabela 1 kažeta, da se kazanje vlagomerov na letni osnovi spremeni od 0,5 % do največ 4,8 %. Slednja vrednost predstavlja vrednost starejšega senzorja z 12-letno zgodovino umerjanja. Relativno novejši senzorji (desno na grafu) izkazujejo manjše povprečno letno odstopanje med 0,5 % in 0,9 % ter 1,5 % pri enem od proizvajalcev.

Slika 3 prikazuje histogram izmerjenih histerez za 113 različnih impedančnih vlagomerov. Vidimo, da je imelo največ senzorjev (38) histerezo med 0,4 % in 0,6 %. Srednja vrednost histereze je znašala 0,52 %, največja pa je znašala 4,1 %.



Slika 3. Histogram izmerjenih histerez za 113 različnih impedančnih vlagomerov

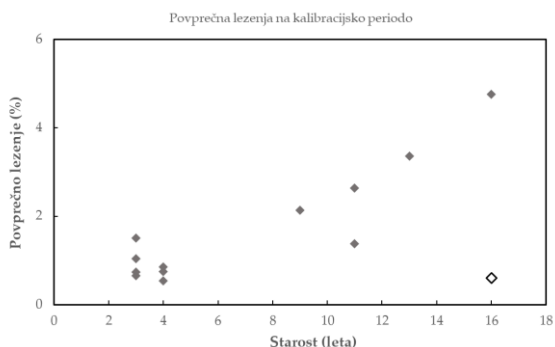
Slika 4 prikazuje histogram standardnih negotovosti zaradi obnovljivosti u_{obn} za 76 različnih senzorjev. Za največjo skupino senzorjev je bila izračunana obnovljivost med 0,3 % in 0,4 %. Mediana obnovljivosti znaša 0,40 %, največja vrednost pa 4,1 %.



Slika 4. Histogram (standardnih negotovosti zaradi) obnovljivosti za 76 različnih senzorjev

5 RAZPRAVA

Največje povprečno lezenje impedančnih vlagomerov je znašalo 4,8 %. To je razmeroma veliko, verjetno zaradi dejstva, da je bil ta konkretni senzor neprekinjeno v uporabi 12 let. Poleg tega so bila lezenja izmerjena v daljših časovnih obdobjih - 30 mesecev. Za primerjavo, novejši senzori s 3 do 4 leta zgodovine umerjanja kažejo boljšo stabilnost - pod 1,5 %, pri čemer je najboljši senzor v povprečju zlezal za približno 0,5 % v 6 mesecih. Slika 5 prikazuje povprečna lezenja glede na čas začetka umerjanja, kar običajno ustreza starosti instrumenta.



Slika 5. Povprečna lezenja glede na čas začetka umerjanja; prazna črna oznaka predstavlja lezenje za drugorazredni rosiščni vlagomer

Opazimo lahko, da se povprečna lezenja od kalibracije do kalibracije z datumom izdelave zmanjšujejo. To kaže na napredek pri razvoju dielektričnega materiala ter izboljšave merilnih metod. Zanimivost iz slike 2 je tudi, da se lahko medletno lezenje spremeni v smeri oz. predznaku, kar kaže naključno naravo tega pojava, še posebej če ni podrobnih informacij o dejanski uporabi s strani lastnika. Zato je za to analizo povprečni medletni premik bolj reprezentativna vrednost kot največji ali

celo najmanjši premik, saj bi slednji lahko v določenem letu pri katerem koli senzoru dosegel vrednost 0 %rh.

Opazimo tudi, da je povprečno odstopanje drugorazrednega rosiščnega vlagomera (prazna črna oznaka na sliki 5) 0,6 % v obdobju 16 let. Čeprav tu ni izrecno prikazano, lahko variabilnost znotraj skupine senzorjev iste vrste (in proizvajalca) povzroči, da naključno izbran senzor proizvede skoraj popolno histerezo ali obnovljivost 0 %. Eden od razlogov za to je variabilnost proizvodnje senzorjev, bolj verjeten vzrok pa je kljub vsemu neničelna negotovost referenčnega sensorja. Zato so za primerjalno analizo bolj reprezentativne povprečne vrednosti. Visoko precizni rosiščni vlagomer, uporabljen za te meritve, ima bistveno nižje vrednosti odstopanja, histereze in obnovljivosti. Ob upoštevanju vseh prispevkov znaša njegova lastna standardna negotovost približno 0,24 %.

6 ZAKLJUČEK

Namen tega dela je izboljšati orodje za spremljanje razvoja impedančnih vlagomerov, kar je trenutno težko določiti zaradi pogosto spregledane korelacije z odzivom referenčnega sensorja. Ko je ta korelacija zmanjšana, so lahko rezultati resnično primerljivi. Histereza, opisana v literaturi v razponu od 1 % do 5 %, na primer zamegljuje smer, v kateri je treba izboljšati lastnosti impedančnih vlagomerov. Da bi zagotovili trdno izhodišče, je bila opravljena primerjalna analiza dolge zgodovine umerjanj vrhunskih komercialno dostopnih vlagomerov, ki so izpostavljeni resničnim industrijskim pogojem.

Analiza je pokazala, da je povprečno letno lezenje pri novejših vlagomerih od 0,5 % do 1,5 %, medtem ko je pri daljših preskusnih obdobjih dosegalo 4,8 %. Mediana histereze je znašala 0,5 %, mediana obnovljivost pa 0,4 %.

LITERATURA

- [1] T. A. Blank, L. P. Eksperiandova in K. N. Belikov, „Recent trends of ceramic humidity sensors development: A review,“ *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 228, pp. 416-442, 6 2016.
- [2] I. Pušnik, „Problematika merjenja s termografskimi kamerami pri ugotavljanju energetske učinkovitosti zgradb,“ *Elektrotehniški vestnik*, Izv. 75, št. 4, pp. 171-176, 2008.
- [3] Š. Kunstelj, M. Rejc in M. Pantoš, „Kratkoročno napovedovanje porabe električne energije po regijah za območje Slovenije,“ *Elektrotehniški vestnik*, Izv. 81, št. 4, pp. 222-228, 2014.
- [4] M. Sitar, S. Beguš, G. Begeš, J. Drnovšek in D. Hudoklin, „Implementacija novega sensorja za merjenje površinske vlažnosti v proizvodni liniji,“ *Elektrotehniški vestnik*, Izv. 83, št. 1-2, pp. 68-72, 2016.
- [5] Y. Zhang in et al., „A Cost-Effective Relative Humidity Sensor Based on Side Coupling Induction Technology,“ *Sensors*, Izv. 17, št. 944, 2017.
- [6] A. B. Petermann in et al., „Polymer Based Whispering Gallery

- Mode Humidity Sensor," *Sensors*, Izv. 18, št. 7, 2018.
- [7] W. Xu in et al., „Relative Humidity Sensor Based on No-Core Fiber Coated by Agarose-Gel Film," *Sensors*, Izv. 17, št. 10, 2017.
- [8] J.-Q. Huang, F. Li, M. Zhao in K. Wang, „A Surface Micromachined CMOS MEMS Humidity Sensor," *Micromachines*, Izv. 6, pp. 1569-1576, 10 2015.
- [9] M. Zhang, S. Wei, W. Ren in R. Wu, „Development of High Sensitivity Humidity Sensor Based on Gray TiO₂/SrTiO₃ Composite," *Sensors*, Izv. 17, p. 1310, 6 2017.
- [10] A. D. Luca, S. Santra, R. Ghosh, S. Z. Ali, J. W. Gardner, P. K. Guha in F. Udrea, „Temperature-modulated graphene oxide resistive humidity sensor for indoor air quality monitoring," *Nanoscale*, Izv. 8, pp. 4565-4572, 2016.
- [11] A. Tripathy, S. Pramanik, A. Manna, H. Shasmin, Z. Radzi in N. A. Osman, „Uniformly Porous Nanocrystalline CaMgFe_{1.33}Ti₃O₁₂ Ceramic Derived Electro-Ceramic Nanocomposite for Impedance Type Humidity Sensor," *Sensors*, Izv. 16, p. 2029, 11 2016.
- [12] Z. Yuan, H. Tai, Z. Ye, C. Liu, G. Xie, X. Du in Y. Jiang, „Novel highly sensitive QCM humidity sensor with low hysteresis based on graphene oxide (GO)/poly(ethyleneimine) layered film," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 234, pp. 145-154, 10 2016.
- [13] G. Fu, H. Chen, Z. Chen, J. Zhang in H. Kohler, „Humidity sensitive characteristics of Zn₂SnO₄-LiZnVO₄ thick films prepared by the sol-gel method," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 81, pp. 308-312, 1 2002.
- [14] J. Lou, Y. Yang in C. Zhao, „Humidity sensors based on octaphenylcyclotetrasiloxane hypercrosslinked porous polymers for non-contact sensing and respiratory monitoring," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 421, 2024.
- [15] X. Ding, H. Ying in X. Chen, „A sub-second QCM humidity sensor with low hysteresis base on Nafion thin film," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 408, 2024.
- [16] S. Yu in et al., „Highly sensitive Ti₃C₂T_x MXenes-RGO humidity sensor for human non-contact respiratory monitoring," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 401, 2024.
- [17] X. Yu in et al., „Low humidity hysteresis and fast response silicon based capacitive humidity sensor based on SiO₂ supported GO film," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 421, 2024.
- [18] Y. Zu in et al., „Electrochemical power generation humidity sensor based on WS₂ nanoflakes," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 405, 2024.
- [19] Y. Yu in et al., „A capacitive humidity sensor based on nanodiamond/silver nanoparticles (ND/Ag) nanocomposite with high stability and rapid response for respiratory monitoring," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 416, 2024.
- [20] X. Yu in et al., „High-response humidity sensor based on silicon microbridge with edge-constrained sandwich sensing structure," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 413, 2024.
- [21] Z. Duan in et al., „High-performance electrochemical power generation humidity sensor based on NaCl/sodium alginate humidity sensing electrolyte and Cu/Zn electrodes for visual humidity indication and respiratory patterns detection," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 409, 2024.
- [22] J.-Y. Qiao in et al., „PVDF-PTFE composite-based electrochemical sensor for monitoring humidity during human physiological movements," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 415, 2024.
- [23] S. Yu in et al., „Highly sensitive Ti₃C₂T_x MXenes-RGO humidity sensor for human non-contact respiratory monitoring," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 401, 2024.
- [24] S. Qiao in et al., „Highly Sensitive Humidity Sensor Based on Oblique Carbon Nanoplumes," *Sensors*, Izv. 18, št. 10, 2018.
- [25] J. Ascorbe in et al., „Humidity Sensor Based on Bragg Gratings Developed on the End Facet of an Optical Fiber by Sputtering of One Single Material," *Sensors*, Izv. 17, št. 5, 2017.
- [26] J. Boudaden in et al., „Polyimide-Based Capacitive Humidity Sensor," *Izv.* 18, št. 5, 2018.
- [27] P. Yasaei, A. Behranginia, T. Foroozan, M. Asadi, K. Kim, F. Khalili-Araghi in A. Salehi-Khojin, „Stable and Selective Humidity Sensing Using Stacked Black Phosphorus Flakes," *ACS Nano*, Izv. 9, pp. 9898-9905, 9 2015.
- [28] K. P. Biju in M. K. Jain, „Sol-gel derived TiO₂:ZrO₂ multilayer thin films for humidity sensing application," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Izv. 128, pp. 407-413, 1 2008.
- [29] S. Kumar, T. Islam in K. K. Raina, „Study of Long Term Drift of Aluminum Oxide Thin Film Capacitive Moisture Sensor," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Izv. 18, pp. 180-188, 6 2018.
- [30] D. Sonntag, „Advancement in the field of hygrometry," *Meteorol. Zeitschrift*, Izv. N.F., št. 3, pp. 51-66, 1994.
- [31] D. Hudokln, J. Bojkovski, J. Nielsen in J. Drnovsek, „Design and validation of a new primary standard for calibration of the top-end humidity sensors," *Measurement*, Izv. 41, št. 9, pp. 950-959, 2008.
- [32] D. Hudoklin in et al., „Inter-laboratory Comparison of Impedance-Type Hygrometer in the Range from 10 % to 95 % at 5 °C to 55 °C," *Int J Thermophys*, Izv. 35, pp. 1273-1279, 2014.

Domen Hudoklin je diplomiral leta 1997 in doktoriral leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo razvoj senzorjev in merilnikov vlažnosti, razvoj merilnih principov in ter primarnih etalonov vlažnosti. V LMK je zadolžen za vzdrževanje nacionalnega etalona vlažnosti.